N° D'ORDRE
736

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Abdul-Karim HALABI

1re **THÈSE :** RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SYSTÉMATIQUES SUR LA RÉSISTANCE A LA TRACTION DES BÉTONS.

2e **THÈSE :** PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 16 mars 1962 devant la Commission d'examen.

MM. SIESTRUNCK, *Président.*
VICHNIEVSKY, COMOLET, *Examinateurs.*
PELTIER, *Invité.*

1962

N° D'ORDRE
736

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Abdul-Karim HALABI

1re **THÈSE :** RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SYSTÉMATIQUES SUR LA RÉSISTANCE A LA TRACTION DES BÉTONS.

2e **THÈSE :** PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 16 mars 1962 devant la Commission d'examen.

MM. SIESTRUNCK, *Président.*
VICHNIEVSKY, COMOLET, *Examinateurs.*
PELTIER, *Invité.*

1962

A mon Pays,

Contribution bien modeste pour son avenir.

A mon père et ma mère,

Témoignage de reconnaissance et d'amour filial. Votre vie de labeur et de dévouement sera toujours, pour moi, un guide et un soutien.

A tous les miens.

A tous mes amis.

A mon président de thèse Monsieur le Professeur SIESTRUNCK qui m'a fait le très grand honneur d'accepter la présidence de cette thèse. Hommage reconnaissant et respectueux.

A Monsieur PELTIER, Directeur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris,

Hommage, bien modeste rendu à celui qui m'a ouvert le chemin de la Science, en acceptant de bien vouloir diriger ce travail, et me guider dans sa réalisation. Qu'il soit assuré de mon souvenir respectueux et de ma reconnaissance, et qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

A Monsieur le Professeur VICHNIEVSKY,

Avec mes sentiments respectueux.

A Monsieur le Professeur COMOLET,

Avec mon respectueux souvenir.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41538124_0058

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen..... M. ZAMANSKY

G. JULIA	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
DE BROGLIE	T	Théories physiques.
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparées.
GRASSÉ	T	Evolution des êtres organisés.
PRÉVOST	T	Chimie organique.
CHAUDRON	T	Chimie appliquée.
WYART	T	Minéralogie et Cristallographie.
TEISSIER	T	Zoologie.
MANGENOT	T	Biologie végétale (Orsay).
AUGER	T	Physique quantique et Relativité.
MONNIER	T	Physiologie générale.
PIVETEAU	T	Paléontologie.
ROCARD	T	Physique (E.N.S.).
CARTAN	T	Mathématiques (E.N.S.).
LAFFITTE	T	Chimie générale.
FAVARD	T	Géométrie supérieure.
COULOMB	T	Physique du Globe.
Mlle COUSIN	T	Biologie animale (S.P.C.N.).
CHRÉTIEN	T	Chimie minérale.
DRACH	T	Zoologie.
KASTLER	T	Physique (E.N.S.).
EPHRUSSI	T	Génétique.
RIVIÈRE	T	Géologie (S.P.C.N.) et sédimentation.
GAUTHERET	T	Biologie végétale (P.C.B.).
LUCAS R.	T	Recherches physiques.
THOMAS A.	T	Biologie cellulaire.
ARNULF	T	Optique appliquée.
MORAND	T	Physique Enseignement.
SOLEILLET	T	Physique (P.C.B.).
FORTIER	T	Mécanique exp. des fluides.
DANJON	T	Astronomie.
PETIT	T	Biologie maritime.
QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.
GALLIEN	T	Embryologie.
EICHHORN	T	Botanique.
DE CUGNAC	T	Bioolgie végétale (S.P.C.N.).
Mlle CAUCHOIS	T	Chimie physique.
THELLIER	T	Physique du Globe.
L'HÉRITIER	T	Biologie générale (Orsay).
GRIVET	T	Radioélectricité (Orsay).
PONCIN	T	Mécanique générale.
DUBREIL	T	Arithmétique et théorie des nombres.

QUELET	T	Chimie organique.
CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.
CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire.
CUVILLIER	T	Micropaléontologie.
JUNG	T	Pétrographie.
TRILLAT	T	Microscopie et diffraction électronique.
WIEMANN	T	Chimie organique et structures.
JACQUINOT	T	Spectroscopie et physique céleste (Orsay).
VASSY	T	Physique de l'atmosphère.
DESTOUCHES	T	Théories physiques.
AMIEL	T	Chimie générale.
HOCART	T	Minéralogie et Cristallographie.
J.-P. MATHIEU	T	Physique (Optique).
COUTEAUX	T	Biologie animale (P.C.B.).
MAY	T	Zoologie (Orsay).
CHOQUET	T	Théorie des fonctions et Topologie.
FELDMANN	T	Biologie végétale marine.
GUINIER	T	Physique des solides (Orsay).
JOST	T	Physiologie comparée.
FORTET	T	Calcul des probabilités et Physique mathém.
SCHWARTZ	T	Calcul différentiel et intégral.
CHOUARD	T	Physiologie végétale.
MALAVARD	T	Aviation (techniques aéronautiques).
BRELOT	T	Calcul différentiel et intégral.
NORMANT	T	Synthèse organique générale.
BÉNARD	T	Chimie minérale.
BUVAT	T	Botanique (E.N.S.).
DUGUÉ	T	Statistiques mathématiques.
SOULAIRAC	T	Psychophysiologie.
ULRICH	T	Physiologie végétale.
MARÉCHAL	T	Optique théorique et appliquée.
KIRRMANN	T	Théories chimiques.
CHADEFAUD	T	Botanique.
Mlle LE BRETON	T	Physiologie de la nutrition.
SALEM	T	Mathématiques générales.
LELONG	T	Application de l'analyse à la géométrie.
DEVILLERS	T	Anatomie et Histologie comparées.
EHRESMANN	T	Topologie algébrique.
FRANÇON	T	Physique (S.P.C.N.).
GLANGEAUD	T	Géographie physique et Géologie dynamique.
GODEMENT	T	Mathématiques (M.P.C.).
PISOT	T	Tech. mathém. de la Physique.
ROCH	T	Géologie.
SCHATZMAN	T	Astrophysique.
TERMIER	T	Paléontologie stratigraphique.
ZAMANSKY	T	Mathématiques générales.
LENNUIER	T	Physique (M.G.P.).
RIZET	T	Génétique (Orsay).
ROUTHIER	T	Géologie appliquée.
Mme TONNELAT	T	Physique théorique.
DIXMIER	T	Mathématiques (M.P.C.).
SOUCHAY	T	Chimie générale.
AIGRAIN	T	Electrotechnique générale.
BRUSSET	T	Chimie systématique.
M. LÉVY	T	Physique théorique des hautes énergies (Orsay).
Mme CHAIX	T	Chimie biologique.
Mme HUREL-PY		Biologie végétale (P.C.B.).

PIAUX	T	Chimie (M.P.C.).
BRUN	T	Mécanique théorique des fluides.
LEDERER	T	Chimie biologique.
Mme DUBREIL	T	Mathématiques (Agrégation).
Mme LELONG	T	Mathématiques (E.N.S.).
BELLAIR	T	Géologie (S.P.C.N.).
COTTE	T	Physique électricité.
DUBOIS J.-E.	T	Chimie organique.
LAMOTTE	T	Zoologie (E.N.S.).
MICHEL A.	T	Chimie minérale (Orsay).
OLMER	T	Energétique générale.
ROUAULT	T	Electricité (Orsay).
GAUTHIER	T	Mécanique appliquée.
BARCHEWITZ	T	Chimie physique.
BROSSEL	T	Physique atomique.
BUSER		Physiologie comparée.
CAMUS		Physiologie végétale (B.M.P.V.).
CASTAING	T	Physique (Orsay).
CURIEN	T	Minéralogie et Cristallographie.
MOYSE	T	Physiologie végétale (Orsay).
NOIROT		Evolution des Etres organiques.
PANNETIER	T	Chimie générale (Orsay).
POSSOMPES	T	Zoologie.
PULLMANN	T	Chimie théorique.
TEILLAC	T	Physique nucléaire et Radioactivité.
TONNELAT	T	Biologie physico-chimique.
VILLE	T	Econométrie.
WILLEMART		Chimie (P.C.B.).
DODE	T	Chimie (Orsay).
FREYMANN	T	Recherches physiques.
GUINOCHET	T	Biologie végétale (S.P.C.N.) (Orsay).
ROLLET	T	Chimie (P.C.B.).
Mlle JOSIEN	T	Chimie (S.P.C.N.).
CHEVALLEY	T	Géométrie algébrique et théorie des groupes.
ARNOULT	T	Electronique (Orsay).
CHAPELLE	T	Physique (Orsay).
DELANGE	T	Mathématiques (Orsay).
DENY	T	Mathématiques générales (Orsay).
GERMAIN	T	Mécanique théorique des fluides.
LUCAS G.	T	Géologie.
ALLARD	T	Chimie physique.
BERTHELOT	T	Physique fondamentale des Hautes Energies (Orsay).
BRICART	T	Météorologie et physique de l'Atmosphère.
Mme ALBE-FESSARD		Psychophysiologie.
FRIEDEL		Physique des Solides (Orsay).
M. JULIA		Etudes des Molécules naturelles complexes.
LENDER	T	Biologie animale (S.P.C.N.) (Orsay).
MAGAT		Physico-chimie des radio-éléments.
Mlle QUINTIN	T	Electrochimie.
MONOD	T	Chimie du métabolisme.
BENOIT	T	Physiologie animale (Orsay).
DE POSSEL	T	Analyse numérique.
CHARLOT	T	Chimie analytique.
HAISSINSKY	T	Radiochimie.
LEMÉE	T	Physiologie végétale (B.M.P.V.) (Orsay).
GUÉRIN	T	Chimie (M.P.C.) (Orsay).

CHATELET M.		Chimie (P.C.B.).
JEAN	T	Physique nucléaire (Orsay).
MATTLER	T	Physique (S.P.C.N.).
MICHEL L.		Physique théorique des hautes énergies (Orsay).
BERGERARD		Zoologie (Orsay).
BERTEIN		Electronique (Orsay).
BOUISSIÈRES		Chimie des Radioéléments (Orsay).
Mme COUTURE		Thermodynamique et mécanique physique.
ELLENBERGER		Géologie appliquée sur le terrain.
FRANC		Biologie animale (P.C.B.).
SCHNELL		Botanique tropicale (Orsay).
STOLKOWSKI		Physiologie générale.
ACHER		Chimie biologique (Orsay).
BAUDOIN		Biologie animale (P.C.B.).
BEAUMONT		Biologie animale (S.P.C.N.).
BLAMONT		Géophysique Ionosphère.
BOURREAU		Botanique.
CURIE D.		Physique (M.G.P.).
DURAND-DELGA		Géologie.
FRÉON	T	Chimie organique (Orsay).
HELLER		Physiologie végétale.
TORTRAT		Calcul des probabilités.
CAILLEUX		Géologie (S.P.C.N.).
MAGNAN	T	Physique (S.P.C.N.).
DAUDEL	T	Mécanique ondulatoire appliquée à la chimie théorique et à la physique nucléaire.
Mlle FOURCROY.....		Biologie végétale (S.P.C.N.).
Mme CHOQUET-BRUHAT	T	Mécanique analytique et mécanique céleste.
Mlle VEIL		Physiologie générale.
LWOFF	T	Microbiologie.
SIESTRUNCK	T	Mécanique physique et expérimentale.
LACOMBE	T	Métallurgie des métaux nucléaires.
BROCHARD	T	Physique (P.C.B.) (Orsay).
CABANNES	T	Mécanique générale.
LESIEUR	T	Mathématiques (M.P.C.) (Orsay).
MAZET	T	Mécanique générale (Orsay).
CAIRE		Géographie physique et Géologie dynamique.
COMOLET		Mécaniques des fluides.
CORABŒUF		Physiologie animale.
DELLOUE		Physique de l'exosphère.
GORENFLOT		Botanique II (Orsay).
HOUILLON		Biologie animale (P.C.B.).
JULLIEN J.		Chimie (P.C.B.).
MALGRANGE		Tech. mathém. de la physique.
OLIVIER		Antropologie.
NOZERAN	T	Botanique II (Orsay).
BLANC-LAPIERRE ...		Physique (E.N.S.) (Orsay).

Secrétaire général ..... R. POULLAIN

Recherches expérimentales systématiques sur la résistance à la traction des bétons

par Abdul-Karim HALABI
Ingénieur-Docteur

Le béton prenant dans le Génie Civil une importance de plus en plus grande, son exécution a nécessité l'emploi de techniques et de matériaux appropriés à chaque type de béton.

Si les règles actuelles de composition du béton permettent la fabrication de celui-ci, en offrant les garanties de qualité nécessaires, les formules de calcul permettant d'évaluer à l'avance sa résistance en fonction des facteurs intervenant dans sa composition, si correctes soient-elles en ce qui concerne la compression, sont assez mal définies en ce qui concerne la traction. En effet, faute d'essais précis, il n'avait pas été possible, jusqu'à présent, d'entreprendre une étude de résistance du béton à la traction pouvant s'appuyer sur des résultats expérimentaux. Cependant, deux modes d'essais ont été mis au point récemment :

— l'essai de compression diamétrale dit essai MESNAGER ou BRÉSILIEN ;

— l'essai de traction pure ou essai de M. PELTIER, Directeur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Afin de dégager les critères éventuels permettant l'établissement d'une formule précise donnant la résistance à la traction d'un béton en fonction des divers facteurs intervenant dans sa composition, une étude basée sur les résultats expérimentaux recueillis à l'aide des deux essais cités plus haut, et qui fait l'objet de la présente note, a été entreprise, ainsi qu'exposé ci-après :

I. - But et intérêt de la recherche

Le but de la présente étude est d'améliorer la résistance du béton à la traction, car jusqu'à nos jours on a surtout considéré que le béton travaillait à la compression en négligeant sa résistance à la traction. Par exemple :

1) Dans les bétons de masse ou les bétons de voûtes, on se contente de faire passer la résultante générale des forces agissant sur la masse de béton de l'ouvrage par le tiers central. On néglige donc complètement la résistance du béton à la traction ;

2) Dans le béton armé, on fait travailler l'acier à la traction et le béton à la compression en considérant généralement que le béton est fissuré avant l'application des sollicitations et qu'il ne peut donc travailler à la traction ;

3) Enfin, dans le béton précontraint, on soumet les armatures d'une structure à une tension préalable au bétonnage ; une fois celui-ci réalisé, on les libère avant la mise en service ; le béton se trouve ainsi comprimé. Cette compression préalable à l'action des surcharges présente des avantages importants puisque les contraintes de traction admissible dans l'ouvrage en service peuvent alors atteindre ce taux de précontrainte, sans qu'il y ait réellement traction dans les bétons.

Dans tous les cas, on ne tient pas compte de la résistance du béton à la traction. Il en résulte un accroissement du prix de revient de l'ouvrage, car la négligence de la résistance à la traction amène à augmenter l'épaisseur de l'ouvrage et surtout dans les ouvrages en béton armé et béton précontraint. D'autre part, les fissures provoquées par la faiblesse de la résistance du béton à la traction, laissant l'eau pénétrer au sein du béton et attaquer l'acier dans les zones où se trouvent les armatures, la résistance générale de l'ouvrage s'en trouvera amoindrie.

On peut conclure de ce bref exposé que si on améliore la résistance du béton à la traction, on peut aboutir à deux résultats :

1) Réduire ou même empêcher la formation des fissures qui affaiblissent la résistance de l'ouvrage ;

2) Economie dans l'emploi des matériaux, économie due à l'allégement de l'ouvrage.

II. - Processus de la recherche

L'idée directrice de cette étude est la définition d'une théorie de la résistance à la traction des bétons par l'exploitation des résultats obtenus sur des bétons à facteurs de composition et de conservation variables.

III. - Description des essais mécaniques

1) Essai Brésilien :

Il consiste à confectionner une éprouvette de béton cylindrique de 18 cm de diamètre et 36 cm de hauteur et à la placer entre les plateaux d'une presse en la couchant de façon qu'elle soit en contact par deux génératrices opposées avec ces plateaux ; on interpose des cartons pour que le contact avec les plateaux soit aussi homogène que possible (fig. 1, 2, 3).

La résistance du béton à la traction d'après cet essai est donnée par la formule suivante :

$$R_t = \frac{P}{\pi \cdot R \cdot h}$$

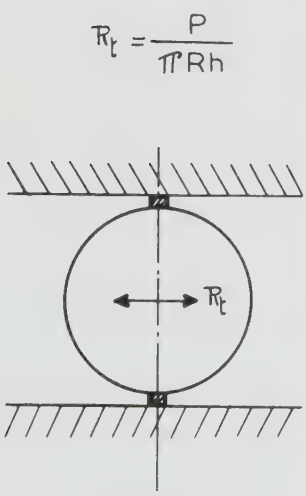


Fig. 1

Essai de compression diamétrale ou essai Brésilien.

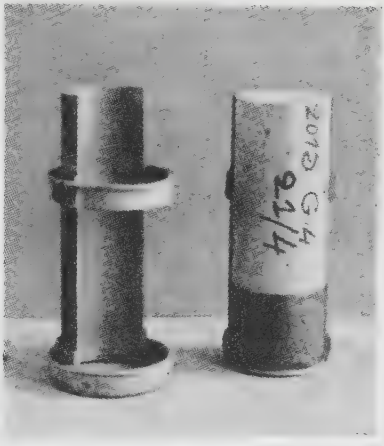


Fig. 2

Eprouvette cylindrique pour essai Brésilien présentée avec son moule.
(Diam.: 18 cm - Haut.: 36 cm).

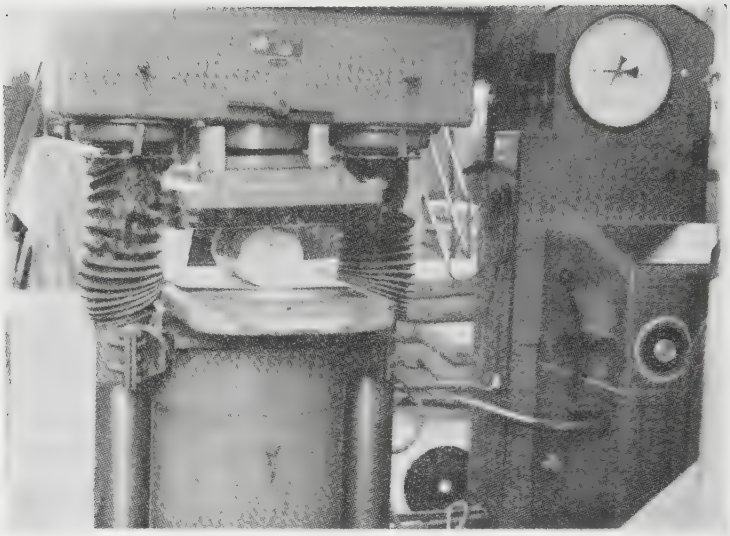


Fig. 3

Aspect de l'éprouvette en cours de rupture.

où :

P : est la charge appliquée par la presse au moment de la rupture,
$\pi \cdot R \cdot h$: est la demi-surface latérale du cylindre.

Les éprouvettes étant très maniables, et les précautions à prendre étant très simples, cet essai est très facile à réaliser ; mais les résultats obtenus sont assez dispersés.

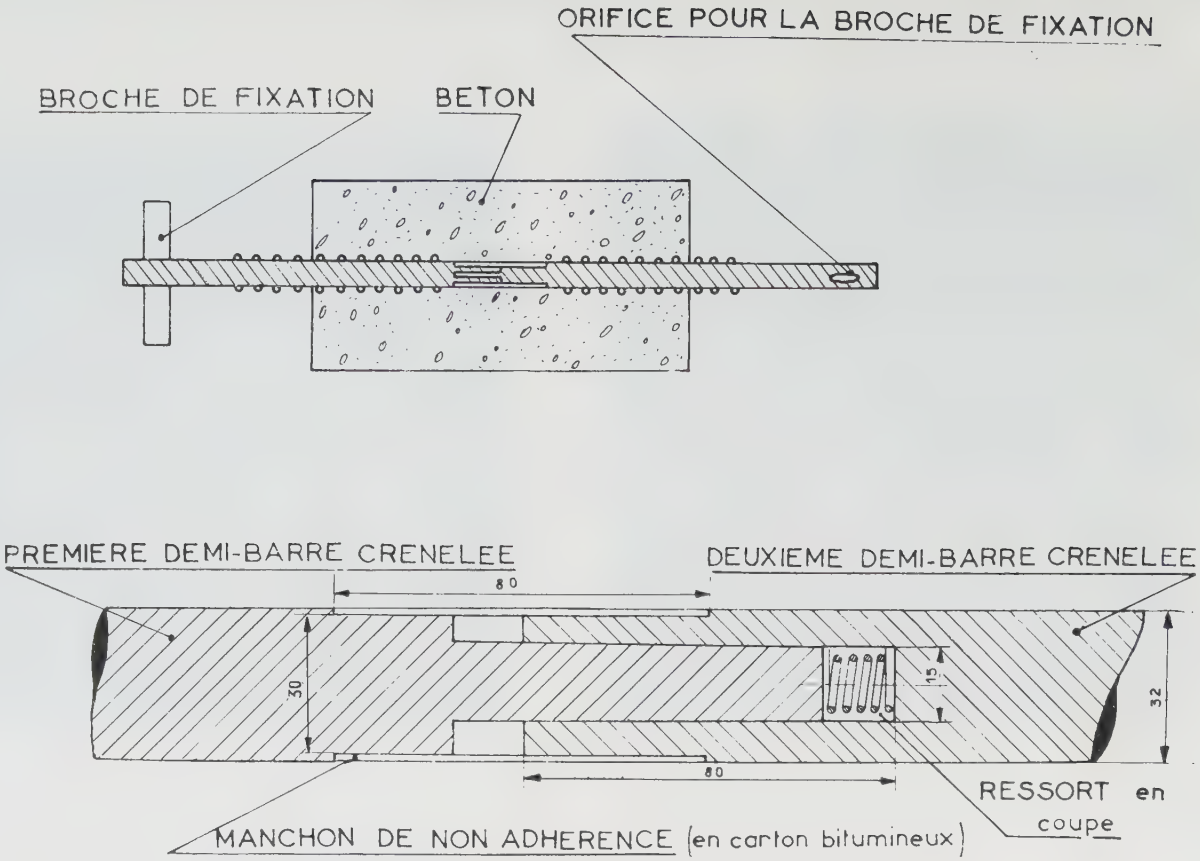
2) Essai de M. Peltier :

Il consiste à confectionner des éprouvettes de béton dans des moules métalliques de 18 cm de diamètre et 36 cm de hauteur dans l'axe desquels est placée une tige d'acier crénelée de 32 mm de diamètre (fig. 4, 5, 6).

Après la prise du béton, l'éprouvette est démoulée et elle adhère fortement à la tige d'acier crénelée.

En fait, cette tige est composée de deux parties indépendantes, mais qui restent alignées, grâce à un dispositif de coulissement l'une dans l'autre dans leur partie centrale.

Fig. 4


ORIFICE POUR LA BROCHE DE FIXATION
BROCHE DE FIXATION
BETON
PREMIERE DEMI-BARRE CRENELEE
DEUXIEME DEMI-BARRE CRENELEE
80
30
15
32
80
RESSORT en coupe
MANCHON DE NON ADHERENCE (en carton bitumineux)

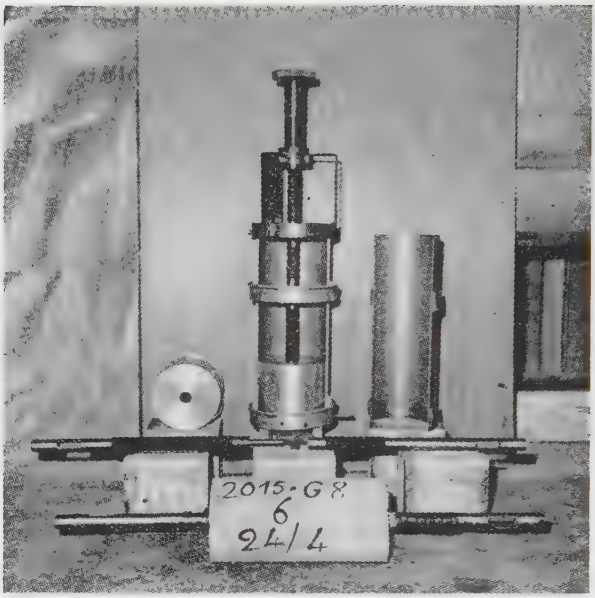


Fig. 5 Eprouvette cylindrique pour essai de M. PELTIER avec le dispositif de moulage.

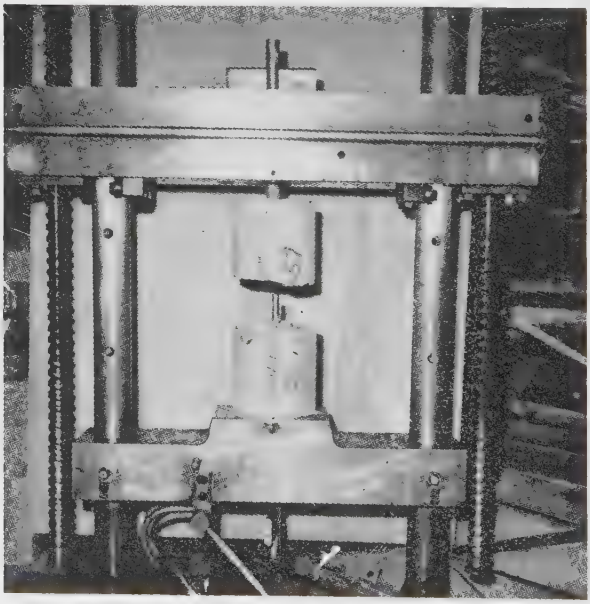


Fig. 6 Aspect d'une éprouvette après la rupture.

On remarquera qu'un petit ressort maintient légèrement écartées les deux tiges, ceci dans le but d'éviter des contraintes internes dues au retrait du béton, alors que l'acier lui-même ne se déforme pas.

On remarquera aussi que les deux tiges d'acier sont usinées et polies dans leur partie centrale. On les recouvre avec un manchon de toile imperméable qui évite toute adhérence entre les tiges et le béton, ceci dans le but de réaliser un champ de contrainte très homogène dans cette zone où se produit la rupture.

On remarquera enfin que chaque tige comporte à son extrémité libre un orifice, dans lequel on fait passer une broche lors de l'essai de traction.

Cet essai est très facile à réaliser et la dispersion étant très faible, on peut donc dire que cet essai est simple, fidèle et précis. Il représente vraiment un essai-type pour mesurer la résistance du béton à la traction.

La résistance du béton à la traction d'après cet essai est de :

$$R_t = \frac{P}{\pi \cdot R^2}$$

où :

P : la charge de traction au moment de la rupture,

R : le rayon de l'éprouvette cylindrique.

IV. - Comparaison des résultats obtenus entre les deux modes d'essais de traction

On a comparé les résultats observés sur ces deux essais statistiquement d'après les formules suivantes.

La variance commune est :

$$S^2 = \frac{(Y_1 - \bar{Y}_1)^2 + (Y_2 - \bar{Y}_2)^2}{N_1 + N_2 - 2}$$

Y_1 Valeur quelconque de la première série (Essai Brésilien).

$\bar{Y}_1$ Moyenne arithmétique de la première série.

N_1 Nombre de valeurs de la première série.

Y_2 Valeur quelconque de la deuxième série (ESSAI de M. PELTIER).

$\overline{Y}_2$ Moyenne arithmétique de la deuxième série.

N_2 Nombre de valeurs de la deuxième série.

La variance de la différence des deux séries est :

$$S^2_{(\overline{Y}_1 - \overline{Y}_2)} = \frac{S^2}{N_1} + \frac{S^2}{N_2}$$

on en déduit : $S_{(\overline{Y}_1 - \overline{Y}_2)}$ par extraction de la racine.

L'écart réduit calculé est :

$$t' = \frac{| \overline{Y}_1 - \overline{Y}_2 |}{S_{(\overline{Y}_1 - \overline{Y}_2)}}$$

On cherche sur la table de distribution de t au degré de liberté $n = N_1 + N_2 - 2$ et à la probabilité choisie (seuil de 0,05), la valeur correspondante.

Si t' calculé $< t$ lu : pas de différence significative.

Si t' calculé $> t$ lu : il y a une différence significative ; et les deux essais sont statistiquement différents.

Le calcul montre, selon le tableau suivant, qu'il y a en général une différence significative entre les deux essais, mais on peut constater d'après la variance commune que l'essai de M. PELTIER est moins dispersé que l'essai BRÉSILIEN.

$$S^2 = \frac{327{,}666 + 213{,}421}{24 + 24 - 2} = \frac{541{,}087}{46} = 11{,}763$$

$$S^2_{(\overline{Y}_1 - \overline{Y}_2)} = \frac{11{,}763}{24} + \frac{11{,}763}{24} = 0{,}980$$

$$S_{(\overline{Y}_1 - \overline{Y}_2)} = \sqrt{0{,}980} = 0{,}990.$$

$$t' = \frac{30{,}654 - 22{,}758}{0{,}990} = \frac{7{,}896}{0{,}990} = 7{,}976$$

CIMENT C.P.A. 210/325 — DOSAGE 350 kg

EAU : 145 l, 155 l, 165 l, 175 l, 185 l — SABLE DE SEINE 0/6.

CONSERVATION : Air humide — AGE : 28 jours.

Nombre d'éprouvettes	Résistance en kg/cm² ESSAI BRÉSILIEN		
	Y_1	$\lvert Y_1 - \overline{Y}_1 \rvert$	$(Y_1 - \overline{Y}_2)^2$
1	33,500	10,742	115,391
2	22,600	0,158	0,025
3	22,100	0,658	0,433
4	25,200	2,442	5,963
5	21,500	1,258	1,583
6	28,300	5,542	30,714
7	27,300	4,542	20,630
8	18,900	3,858	14,884
9	23,000	0,242	0,059
10	23,000	0,242	0,059
11	23,600	0,842	0,709
12	22,600	0,158	0,025
13	24,200	1,442	2,079
14	22,400	0,358	0,128
15	19,800	2,958	8,750
16	23,000	0,242	0,059
17	22,000	0,758	0,575
18	16,300	6,458	41,706
19	19,100	3,658	13,381
20	22,800	0,042	0,002
21	14,700	8,058	64,931
22	24,000	1,242	1,543
23	24,400	1,642	2,696
24	21,600	1,158	1,341
	$\overline{Y} = 22,758$	Total :	327,666

CIMENT C.P.A. 210/325 — DOSAGE 350 kg

EAU : 145 l, 155 l, 165 l, 175 l, 185 l — SABLE DE SEINE 0/6.

CONSERVATION : Air humide — AGE : 28 jours.

Nombre d'éprouvettes	Résistance en kg/cm² ESSAI M. PELTIER		
	Y_2	$\lvert Y_2 - \overline{Y}_2 \rvert$	$(Y_2 - \overline{Y}_2)^2$
1	31,500	0,0846	0,716
2	34,800	4,146	17,189
3	31,000	0,346	0,120
4	30,800	0,146	0,021
5	29,600	1,054	1,111
6	40,000	9,346	87,348
7	33,300	2,646	7,001
8	34,100	3,446	11,875
9	29,800	0,854	0,729
10	26,800	3,854	4,853
11	31,600	0,946	0,895
12	33,500	2,846	8,100
13	30,000	0,654	0,428
14	26,200	4,454	19,838
15	30,400	0,254	0,065
16	29,900	0,754	0,569
17	29,600	1,054	1,111
18	30,800	0,146	0,021
19	31,000	0,346	0,120
20	28,800	1,854	3,347
21	28,000	2,654	7,044
22	25,400	5,254	27,605
23	29,200	1,454	2,114
24	29,600	1,054	1,111
	$\overline{Y}_2 = 30,654$	Total :	213,421

t lu au seuil 0,05 et avec $N = 24 + 24 - 2 = 46$ est de :

$$2{,}021 < 7{,}976,$$

donc : les deux essais sont statistiquement différents.

V. - Définition de la méthode de composition granulométrique du béton utilisé

La méthode granulométrique utilisée récemment dans le béton routier est la méthode granulométrique de type BOLOMEY qui se rapproche de la méthode à courbe granulométrique continue employée aux Etats-Unis et utilisée pour les bétons dits « américains » ; c'est cette méthode qui a été choisie pour le béton utilisé ; c'est d'ailleurs une granulométrie analogue qui est utilisée pour la composition des bétons, type béton armé.

La première question que l'on peut se poser est la suivante : Pourquoi a-t-on choisi la granulométrie continue ? et quel est le but de la méthode BOLOMEY ?

La réponse est celle-ci : la granulométrie continue est une granulométrie étudiée non seulement en vue d'obtenir un béton très compact, mais aussi pour éviter la ségrégation et pour avoir un béton maniable ; c'est donc un élément essentiel pour le béton en général et notamment pour le béton routier.

La courbe de BOLOMEY est une parabole définie par l'équation suivante :

$$Y = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

où :

Y : est le pourcentage des grains dont la grosseur doit être égale ou inférieure à l'abscisse courante de la dimension du grain d.

D : est la grosseur des plus gros grains.

A : est un coefficient « ordonnée à l'origine » définissant le pourcentage des ultras-fins « ciment », éventuellement farine minérale. Dans le cas du béton utilisé pour la présente étude, la valeur $A = 12$ a été choisie pour ce coefficient, car il s'agit en majorité de matériaux roulés « sable de Seine 0/6, gravillon de Seine 5/15, Diorite 20/40 ».

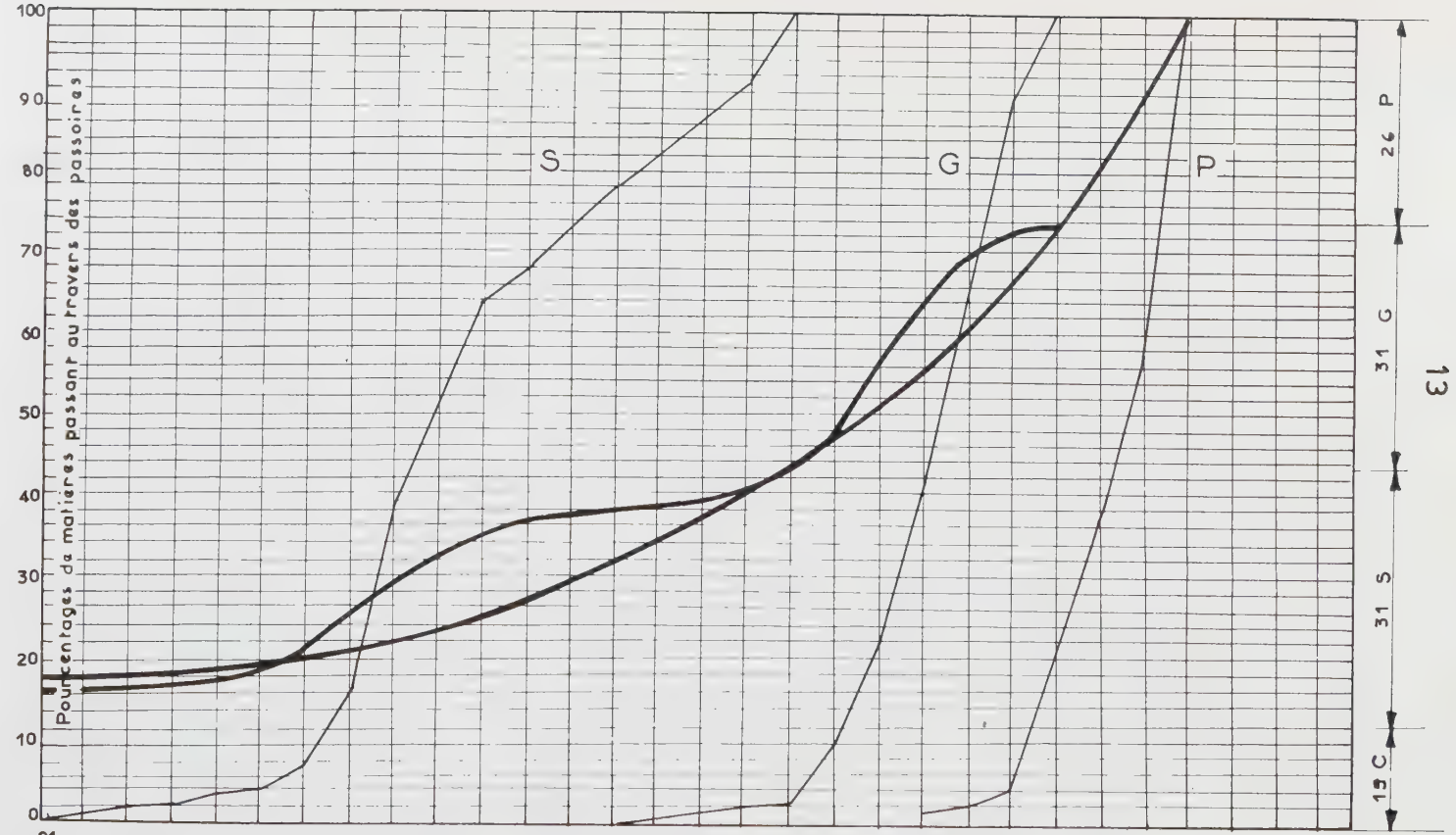


Fig. 7 Courbe granulométrique réelle des matériaux disponibles

Pour déterminer les pourcentages de différentes classes de granulats, il suffit de juxtaposer les courbes granulométriques propres du sable, du gravillon et du caillou sur la courbe de BOLOMEY, on obtient ainsi une courbe qui suit sensiblement la courbe granulométrique de BOLOMEY. La figure 7 représente la courbe de BOLOMEY, les courbes granulométriques de différentes classes de granulats, ainsi que le pourcentage des différents éléments constituant le béton.

VI. - Première ébauche d'une théorie

Figurons un plan de coupe au sein d'une éprouvette de béton soumise à un effort de traction (fig. 8).

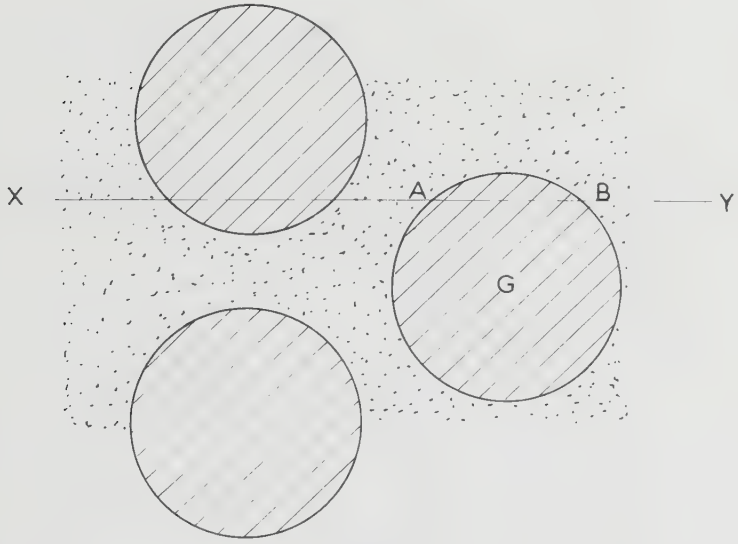


Fig. 8

On suppose tout d'abord que le béton se rompt à la traction suivant un plan X Y (ceci est d'ailleurs vérifié expérimentalement, d'une façon approximative tout au moins).

Appelons : g, c, e et v, les volume élémentaires respectifs de granulat g (y compris le sable), c du ciment, e de l'eau et v des vides.

Supposons : $g + c + e + v = 1$.

La surface découpée par la section plane dans le granulat est g, celle hors granulat est $1 - g$.

Considérons un grain G, coupé par la section plane X Y. La résistance à la rupture des grains est supposée être assez élevée pour qu'il ne se rompe pas ; la rupture aura donc lieu dans les aiguilles de ciment et le long de la surface AB.

On peut alors admettre que la résistance à la traction du béton sera proportionnelle à :

$$R_t = A\,(1 - g) + B \cdot g$$

où :

A et B sont des coefficients.

A : tient compte de la résistance de la pâte pure ;

B : tient compte à la fois de la forme des grains et de la résistance de la pâte pure ou de la force d'accrochage de la pâte pure sur les grains.

En réalité, la rupture ne se produira pas suivant un plan parfait, mais suivant une surface grossièrement plane, correspondant à l'effort minimum de rupture ; cette surface ne passera que dans les zones de pâte pure, en contournant les grains.

D'autre part, en première approximation, on peut admettre que A et B sont proportionnels à la densité des aiguilles de ciment et à la qualité de celles-ci.

Or, la densité des aiguilles de ciment est dans l'espace intergranulaire porportionnelle à : $\dfrac{C}{1 - g}$

On peut alors prendre :

$$A = A' \frac{C}{1 - g}$$

$$B = B' \frac{C}{1 - g}$$

A' : tient compte de la densité des aiguilles de ciment dans la pâte intergranulaire ;

B' : tient compte de la densité des aiguilles tout autour du grain de granulat :

$$R_t = A' \frac{C}{1-g} (1-g) + B' \frac{C \cdot g}{1-g}$$

$$R_t = A'C + B' \frac{C \cdot g}{1-g}$$

$$R_t = C \left(A' + B' \frac{g}{1-g} \right)$$

Si l'on prend : $A' = K$

$B' = K K'$

où :

K : coefficient qui tient compte de l'énergie et de la qualité du ciment,

K' : coefficient qui tient compte de la forme du granulat.

On peut écrire :

$$R_t = C \left(K + \frac{KK' g}{1-g} \right)$$

$$R_t = CK \left(1 + \frac{K' g}{1-g} \right)$$

$$R_t = CK \left(1 + \frac{K' g}{c+e+v} \right.$$

$$R_t = CK \left(1 + \frac{K' [1-(c+e+v)]}{c+e+v} \right)$$

$$R_t = CK \left(1 + \frac{K'}{c+e+v} - K' \frac{c+e+v}{c+e+v} \right)$$

$$R_t = CK \left(1 - K' + \frac{K'}{c+e+v} \right)$$

$$\frac{R_t}{c} = K (1-K') + \frac{KK'}{c+e+v}$$

Il s'agit donc de bien mesurer et de calculer avec précision : R_t, c, e, v pour chaque éprouvette essayée.

En prenant pour chaque nature de ciment les résultats sur un diagramme comportant :

$$\text{en abscisse :} \qquad x = \frac{1}{c + e + v}$$

$$\text{et en ordonnée :} \quad Y = \frac{R_t}{c}$$

on doit obtenir des droites :

$$Y = K\,(1 - K') + KK'\,x$$

d'où l'on déduira K et K′ statistiquement.

Le calcul statistique montre, d'une part, qu'il existe une assez bonne corrélation entre $Y = \frac{R_t}{c}$ et $x = \frac{1}{c + e + v}$, car le coefficient de corrélation varie de 0,60 à 0,76 ; et d'autre part, que K′ est constant, de l'ordre de 1, mais que le coefficient K qui caractérise la nature du liant varie énormément. Cela veut dire que la résistance du béton à la traction dépend de la texture du ciment et de la composition chimique de cette pâte, et que la forme de granulat constituant le béton n'intervient pas dans le calcul de cette résistance ; on peut donc écrire l'équation précédente sous la forme :

$$R_t = K \frac{c}{c + e + v}$$

$$R_t = K = \frac{c}{1 - g}$$

Le tableau suivant, la courbe correspondante et les opérations mathématiques donnent les résultats statistiques.

Ecart-type estimé de x :

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{(X - \bar{X})^2}{N - 1}} = 24{,}205 \cdot 10^{-5}$$

Ecart-type estimé de Y :

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{(Y - \bar{Y})^2}{N - 1}} = 42{,}429 \cdot 10^{-3}$$

Essai Brésilien

CIMENT C.P.A. 210/325 — DOSAGE 280 kg
» » 330 kg
» » 350 kg
» » 400 kg
» » 450 kg

EAU : 145 l, 155 l, 165 l, 175 l, 185 l — SABLE DE SEINE 0/6.

CONSERVATION : Air humide — AGE : 28 jours.

X 10^{-5}	Y 10^{-3}	$(X-\bar{X})$ 10^{-5}	$(Y-\bar{Y})$ 10^{-3}	$(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})$ 10^{-8}	$(X-\bar{X})^2$ 10^{-10}	$(Y-\bar{Y})^2$ 10^{-6}
379	257	+ 49	+ 41	+ 2009	2401	1681
389	313	+ 59	+ 97	+ 5723	3481	9409
381	285	+ 51	+ 69	+ 3519	2601	4761
383	240	+ 53	+ 24	+ 1272	2809	576
383	274					
355	316	+ 25	+100	+ 2500	625	10000
350	238	+ 20	+ 22	+ 440	400	484
355	244	+ 25	+ 28	+ 700	625	784
355	287	+ 25	+ 80	+ 2000	625	6400
365	268	+ 35	+ 52	+ 1820	1225	2704
362	260	+ 32	+ 44	+ 1408	1024	1936
363	233	+ 33	+ 17	+ 561	1089	289
365	261	+ 35	+ 45	+ 1575	1225	2025
365	264	+ 35	+ 48	+ 1680	1225	2304
365	266	+ 35	+ 50	+ 1750	1225	2500
365	267	+ 35	+ 51	+ 1785	1225	2601
360	269					
342	242	+ 12	+ 26	+ 312	144	676
344	244	+ 14	+ 28	+ 392	196	784
358	261	+ 28	+ 45	+ 1260	784	2025
258	266	+ 28	+ 50	+ 1400	784	2500
346	262	+ 16	+ 46	+ 736	256	2116
346	232	+ 16	+ 16	+ 256	256	256
352	225	+ 22	+ 9	+ 198	484	81

Essai Brésilien (Suite)

X 10^{-5}	Y 10^{-3}	$(X-\bar{X})$ 10^{-5}	$(Y-\bar{Y})$ 10^{-3}	$(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})$ 10^{-8}	$(X-\bar{X})^2$ 10^{-10}	$(Y-\bar{Y})^2$ 10^{-6}
349	247					
336	195	+ 6	— 21	— 126	36	441
329	186	— 1	— 30	+ 30	1	900
337	235	+ 7	+ 19	+ 33	49	361
346	258	+ 16	+ 42	+ 672	256	1764
337	257	+ 7	+ 41	+ 287	49	1681
343	238	+ 13	+ 22	+ 286	169	484
346	222	+ 16	+ 6	+ 96	256	36
343	199	+ 13	— 17	— 221	169	289
356	275	+ 26	+ 59	+ 1534	676	3481
340	249	+ 10	+ 33	+ 330	100	1089
341	198	+ 11	— 18	— 198	121	324
341	228					
362	301	+ 32	+ 85	+ 2720	1024	7225
362	225	+ 32	+ 9	+ 288	1024	81
360	274	+ 30	+ 58	+ 1740	900	3364
364	203	+ 34	— 13	— 442	1156	169
362	251					
350	295	+ 20	+ 79	+ 1580	400	6241
353	268	+ 23	+ 52	+ 1196	529	2704
346	246	+ 16	+ 30	+ 480	256	900
346	212	+ 16	— 4	— 64	256	16
249	255					
325	283	— 5	+ 67	— 335	25	4489
333	211	+ 3	— 5	— 15	9	25
336	190	+ 6	— 26	— 156	36	676
336	256	+ 6	+ 40	+ 240	36	1600
333	235					
324	194	— 6	— 22	+ 132	36	484

Essai Brésilien (Suite)

X 10^{-5}	Y 10^{-3}	$(X-\bar{X})$ 10^{-5}	$(Y-\bar{Y})$ 10^{-3}	$(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})$ 10^{-8}	$(X-\bar{X})^2$ 10^{-10}	$(Y-\bar{Y})^2$ 10^{-6}
317	207	— 13	- 9	+ 117	169	
317	176	— 13	— 40	+ 520	169	1600
322	171	- 8	- 45	+ 360	64	2025
320	187					
311	145	— 19	— 71	+ 349	361	5041
307	156	— 23	- 60	+ 1380	529	3600
311	187	— 19	— 29	+ 551	361	841
314	171	— 16	- - 45	+ 720	256	2025
311	165					
352	308	+ 22	+ 92	+ 2024	484	8464
350	208	+ 20	— 8	— 160	400	64
355	231	+ 25	+ 15	+ 375	625	225
352	249					
338	198	+ 8	— 18	— 144	64	324
345	259	+ 15	+ 43	+ 645	225	1849
142	251	+ 12	+ 35	+ 420	144	1225
342	236					
337	209	+ 7	- 7	- 49	49	49
333	210	+ 3	- 6	- 18	9	36
330	217	0	+ 1	0	0	1
332	207	+ 2	— 9	— 18	4	81
339	211					
322	205	— 8	— 11	+ 88	64	121
319	182	— 11	- 34	+ 374	121	1156
325	210	— 5	— 6	+ 30	25	36
322	201	— 8	— 15	+ 120	64	225
321	150	— 9	- - 66	+ 594	81	4356
322	175	— 8	— 41	+ 328	64	1681
321	209	— 9	— 7	+ 63	81	49

Essai Brésilien (Suite)

X 10^{-5}	Y 10^{-3}	$(X - \bar{X})$ 10^{-5}	$(Y - \bar{Y})$ 10^{-3}	$(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})$ 10^{-8}	$(X - \bar{X})^2$ 10^{-10}	$(Y - \bar{Y})^2$ 10^{-6}
322	190					
315	134	— 15	— 82	+ 1230	225	6724
311	198	— 19	— 18	+ 342	361	324
311	166					
329	228	— 1	+ 12	— 12	1	144
327	198	— 3	— 18	+ 54	9	324
330	209	0	— 7	0	0	49
329	198	— 1	— 18	+ 18	1	324
329	208					
320	179	— 10	— 37	+ 370	100	1369
327	236	— 3	+ 20	— 60	9	400
327	222	— 3	+ 6	+ 18	9	36
327	236	— 3	+ 20	— 60	9	400
325	218					
318	229	— 12	+ 13	— 156	144	169
315	205	— 15	— 11	+ 165	225	121
315	203	— 15	— 13	+ 195	225	169
314	167	— 16	— 49	+ 784	256	2401
316	201					
308	179	— 22	— 37	+ 814	484	1369
310	174	— 20	— 42	+ 840	400	1764
307	155	— 23	— 61	+ 1403	529	3721
307	175	— 23	— 41	+ 943	529	1681
308	171					
297	186	— 33	— 30	+ 990	1089	900
298	153	— 32	— 63	+ 2016	1024	3969
298	158	— 32	— 58	+ 1856	1024	3364
299	125	— 31	— 91	+ 2821	961	8281

Essai Brésilien (Suite)

X 10^{-5}	Y 10^{-3}	$(X-\overline{X})$ 10^{-5}	$(Y-\overline{Y})$ 10^{-3}	$(X-\overline{X})(Y-\overline{Y})$ 10^{-8}	$(X-\overline{X})^2$ 10^{-10}	$(Y-\overline{Y})^2$ 10^{-6}
298	156					
316	228	— 14	+ 12	— 168	196	144
316	198	— 14	— 18	+ 252	196	324
316	209	— 14	— 7	+ 98	197	49
316	198	— 14	— 18	+ 252	196	324
316	222					
304	179	— 26	— 37	+ 962	676	1369
306	236	— 24	+ 20	— 480	576	400
310	222	— 20	+ 6	— 120	400	36
306	236	— 24	+ 20	— 480	576	400
307	189					
300	229	— 30	+ 13	— 390	900	169
300	205	— 30	— 11	+ 330	900	121
297	203	— 33	— 13	+ 429	1089	169
300	167	— 30	— 49	+ 1470	900	2401
299	188					
293	179	— 37	— 37	+ 1369	1369	1369
295	174	— 35	— 42	+ 1470	1225	1764
291	155	— 39	— 61	+ 2379	1521	3721
296	175	— 34	— 41	+ 1394	1156	1681
294	183					
282	186	— 48	— 30	+ 1440	2304	900
283	153	— 47	— 63	+ 2961	2209	3969
284	158	— 46	— 58	+ 2668	2116	3364
285	125	— 45	— 91	+ 4095	2025	8281
284	147					
$\overline{X}=330$	$\overline{Y}=216$	Total.....		87654	65031	199829

Coefficient de corrélation :

$$r = \frac{\Sigma\,(X - \bar{X})\,(Y - \bar{Y})}{N \cdot \sigma_X\,\sigma_Y} = 0{,}76 \text{ corrélation forte.}$$

L'écart-type de l'erreur commise :

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{N}} = 0{,}04.$$

Coefficient d'existence d'une corrélation :

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1 - r^2}} = 12{,}302.$$

t lu aux seuils 0,01 et 0,05 : 2,576 et 1,960 : donc corrélation significative. Le coefficient de régression Y en X (pente de la droite) est donné par :

$$b = r\,\frac{\sigma_Y}{\sigma_X} = \frac{\Sigma\,X\,Y - N\,\bar{X}\,\bar{Y}}{\Sigma\,X^2 - N\,\bar{X}^2} = 133{,}221.$$

L'équation de la droite mentionnée plus haut a la forme suivante :

$$Y = a + b\,x$$

$b = r\,\frac{\sigma_Y}{\sigma_X} = K\,K'$. La pente de la droite

$a = K\,(1 - K')$ L'ordonnée à l'origine

$K = 132{,}955$ $K' = 1{,}002$.

En substituant ces valeurs dans l'équation de la droite, on obtient :

$$Y = -0{,}224 + 133{,}221\ x.$$

La figure 9 représente cette équation.

VII. - Théorie plus élaborée, basée sur les résultats expérimentaux

Il est utile de pouvoir estimer la résistance à la traction d'un béton à un âge donné, connaissant ses caractéristiques principales : dosages, mise en œuvre, mode de conservation. Il est même nécessaire de connaître la progression des résistances en fonction du temps.

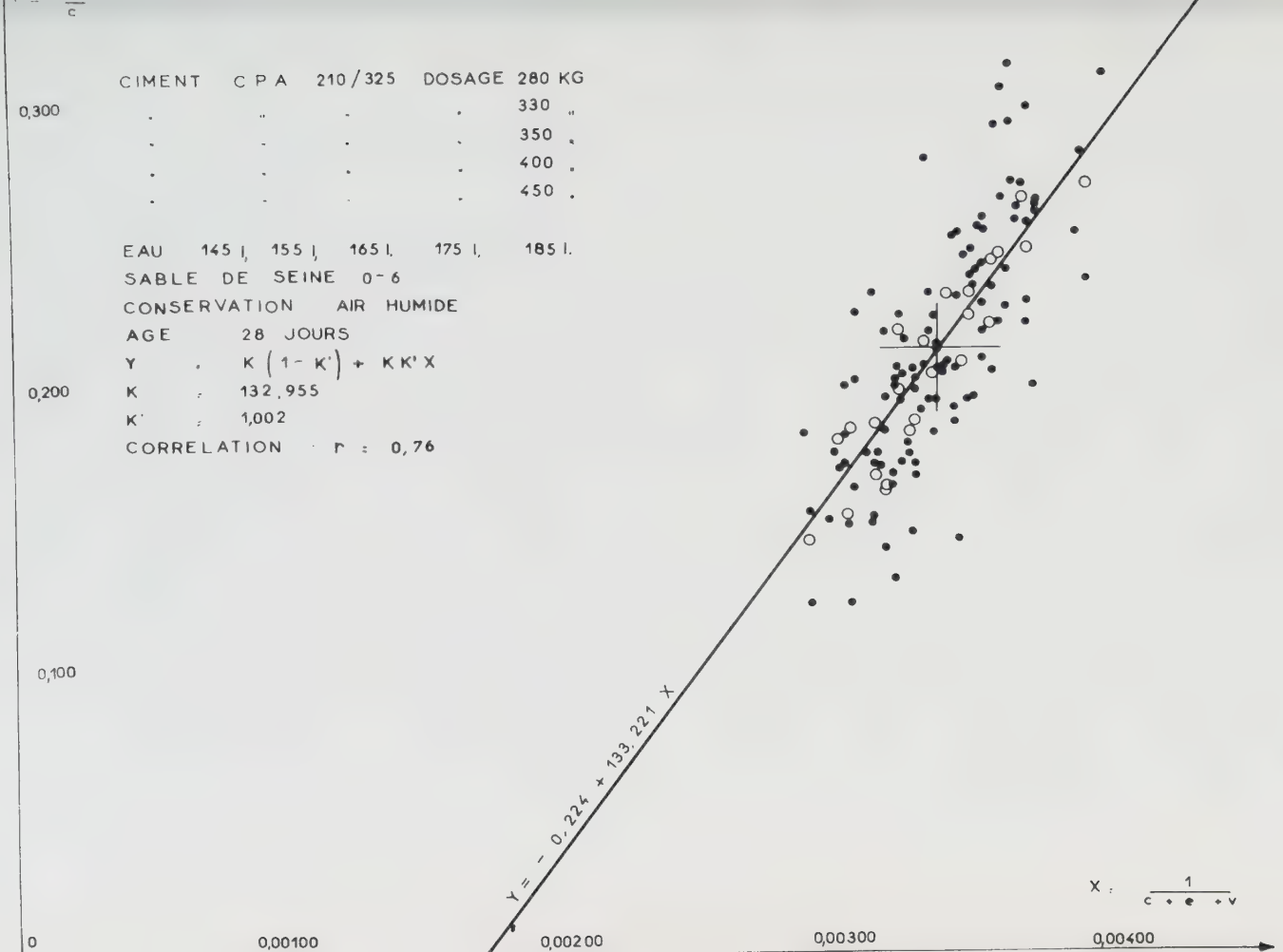


Fig. 9

Essai Brésilien.

En traduisant les résultats expérimentaux par un diagramme d'abscisse : $\frac{1}{c+e+v}$ et d'ordonnée : R_t, on obtient des courbes d'allure parabolique qui peuvent être représentées par une équation de la forme suivante :

$$R_t = \alpha \frac{X^{n'}}{Y^n}$$

où :

α : coefficient qui tient compte de l'énergie du liant, de l'âge du béton et du mode de conservation ;

$X = \frac{1}{c+e+v}$ où c, e, v sont les volumes du ciment, de l'eau et des vides ;

$Y = \frac{1}{c}$ où c est le volume du ciment ;

n, n' : deux puissances.

En prenant $n' = 2$ et en appliquant la méthode des moindres carrés pour le calcul de n et de α, on aura :

$$\text{Log } R_t = \text{Log } \alpha + 2 \text{ Log } X - n \text{ Log } Y$$

$$\text{Log } \alpha + 2 \text{ Log } X - n \text{ Log } Y - \text{Log } R_t = 0.$$

Il faudra annuler les dérivés partielles de l'équation suivante par rapport à α et n et pour 25 valeurs de X et de Y (cas de ciment C.P.A. 210/325, âge 28 jours, conservation : air humide).

$$\sum_{i=1}^{i=25} (\text{Log } \alpha + 2 \text{ Log } X - n \text{ Log } Y - \text{Log } R_t)^2$$

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \sum_{i=1}^{i=25} (\text{Log } \alpha + 2 \text{ Log } X - n \text{ Log } Y - \text{Log } R_t)^2 = \frac{2}{\alpha} \sum_{i=1}^{i=25} (\text{Log } \alpha + 2 \text{ Log } X - n \text{ Log } Y - \text{Log } R_t)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} \sum_{i=1}^{i=25} (\text{Log } \alpha + 2 \text{ Log } X - n \text{ Log } Y - \text{Log } R_t)^2 = 2 \sum_{i=1}^{i=25} - \text{Log } Y (\text{Log } \alpha + 2 \text{ Log } X - n \text{ Log } Y - \text{Log } R_t)$$

En développant et en annulant, on peut écrire :

$$25 \text{ Log } \alpha + 2 \sum_{i=1}^{i=25} \text{Log X} - n \sum_{i=1}^{i=25} \text{Log Y} - \sum_{i=1}^{i=25} \text{Log } R_t = 0$$

$$- \text{Log } \alpha \sum_{i=1}^{i=25} \text{Log Y} - 2 \sum_{i=1}^{i=25} \text{Log X Log Y} + n \sum_{i=1}^{i=25} (\text{Log Y})^2 + \sum_{i=1}^{i=25} \text{Log } R_t \text{ Log Y} = 0.$$

En remplaçant Log X, Log Y et Log R_t par leurs valeurs (voir le tableau suivant), on aura :

$25 \text{ Log } \alpha - 286{,}068 + 117{,}644\ n - 78{,}655 = 0$
$117{,}644 \text{ Log } \alpha - 1346{,}818 + 554{,}456\ n - 370{,}389 = 0$
d'où : $n = 1$ et $\alpha = 20\,000$.

La formule devient :

$$R_t = \alpha \frac{X^2}{Y}$$

$$R_t = \alpha \frac{c}{(c + e + v)^2}$$

Les résultats obtenus selon cette formule sont satisfaisants. En suivant le même principe, on peut calculer α pour les différents âges et différents modes de conservation pour chaque nature du ciment en remarquant que les courbes de progression de α en fonction de l'âge du béton concordent avec les courbes obtenues par la formule de CAQUOT :

$$\alpha = A\ (1 - e^{-\lambda t})$$

où A et α sont deux coefficients.

Le tableau de la page 38 donne les différentes valeurs de α en fonction de l'âge et de la conservation pour un ciment C.P.A. 210/325.

On peut résumer les opérations mathématiques précédentes par le tableau suivant, et représenter les résultats sur les figures 10 et 11.

Essai Brésilien

CIMENT C.P.A. 210/325 — DOSAGE 280 kg
» » 330 kg
» » 350 kg
» » 400 kg
» » 450 kg

$x = \frac{1}{c+e+v}$ 10^{-5}	$y = \frac{1}{c}$ 10^{-3}	Log x déc	Valeur algébrique	Log x nép	Log y déc	Valeur algébrique	Log y nép
383	12	$\bar{3}$,583	— 2,417	— 5,565	$\bar{2}$,079	— 1,921	— 4,423
367	12	$\bar{3}$,565	— 2,435	— 5,608	»	»	»
360	12	$\bar{3}$,556	— 2,444	— 5,627	»	»	»
349	12	$\bar{3}$,543	— 2,457	— 5,658	»	»	»
341	12	$\bar{3}$,533	— 2,467	— 5,681	»	»	»
362	10	$\bar{3}$,559	— 2,441	— 5,621	$\bar{2}$,000	— 2,000	— 4,605
349	10	$\bar{3}$,543	— 2,457	— 5,658	»	»	»
333	10	$\bar{3}$,522	— 2,478	— 5,705	»	»	»
320	10	$\bar{3}$,505	— 2,495	— 5,745	»	»	»
311	10	$\bar{3}$,493	— 2,507	— 5,773	»	»	»
352	9	$\bar{3}$,547	— 2,453	— 5,649	$\bar{3}$,954	— 2,046	— 4,711
342	9	$\bar{3}$,534	— 2,466	— 5,678	»	»	»
333	9	$\bar{3}$,522	— 2,478	— 5,705	»	»	»
322	9	$\bar{3}$,508	— 2,492	— 5,738	»	»	»
311	9	$\bar{3}$,493	— 2,507	— 5,773	»	»	»
329	8	$\bar{3}$,517	— 2,483	— 5,717	$\bar{3}$,903	— 2,097	— 4,828
325	8	$\bar{3}$,512	— 2,488	— 5,729	»	»	»
316	8	$\bar{3}$,500	— 2,500	— 5,757	»	»	»
308	8	$\bar{3}$,489	— 2,511	— 5,783	»	»	»
298	8	$\bar{3}$,474	— 2,526	— 5,815	»	»	»
316	7	$\bar{3}$,500	— 2,500	— 5,757	$\bar{3}$,845	— 2,155	— 4,962
307	7	$\bar{3}$,487	— 2,513	— 5,786	»	»	»
299	7	$\bar{3}$,476	— 2,524	— 5,813	»	»	»
294	7	$\bar{3}$,468	— 2,532	— 5,829	»	»	»
284	7	$\bar{3}$,453	— 2,547	— 5,864	»	»	»
8.217	230	$\bar{62}$,119	— 64,653	— 143,035	$\bar{51}$,092	— 50,992	— 117,64

EAU : 145 l, 155 l, 165 l, 175 l, 185 l — SABLE DE SEINE 0/6.
CONSERVATION : Air humide — AGE : 28 jours.

$$\alpha = 20.000$$

$$R_t = \alpha \frac{c}{(c + e + v)^2}$$

(Log x)^2	(Log y)^2	Log x Log y	R_t réelle kg/cm^2	Log R_t déc	Log R_t nép	Log R_t Log x	Log R_t Log y	R_t ajustée kg/cm^2
30,968	19,562	24,613	23,850	1,377	3,172	— 17,651	— 14,028	24,448
31,445	»	24,802	20,150	1,304	3,003	— 16,841	— 13,283	22,448
31,661	»	24,887	22,850	1,359	3,129	— 17,606	— 13,839	21,600
32,011	»	25,024	22,375	1,350	3,108	— 17,583	— 13,745	20,300
32,275	»	25,127	20,525	1,312	3,021	— 17,165	— 13,363	19,380
31,599	21,208	25,887	25,750	1,411	3,248	— 18,260	— 14,960	26,209
32,011	»	26,055	26,200	1,418	3,266	— 18,477	— 15,039	24,360
32,545	»	26,272	23,925	1,379	3,175	— 18,111	— 14,620	22,178
33,001	»	26,455	19,075	1,280	2,948	— 16,936	— 13,577	20,480
33,329	»	26,586	16,775	1,225	2,820	— 16,278	— 12,985	19,344
31,915	22,189	26,611	25,850	1,412	3,252	— 18,373	— 15,320	27,534
32,241	»	26,747	24,000	1,380	3,178	— 18,045	— 14,970	25,992
32,545	»	26,873	23,050	1,363	3,138	— 17,900	— 14,780	24,642
32,929	»	27,031	21,500	1,332	3,068	— 17,606	— 14,452	23,041
33,329	»	27,195	21,175	1,326	3,053	— 17,623	— 14,379	21,494
32,683	23,313	27,603	25,675	1,409	3,245	— 18,553	— 15,670	27,060
32,823	»	27,662	27,775	1,444	3,324	— 19,043	— 16,049	26,406
33,145	»	27,798	25,100	1,398	3,219	— 18,534	— 15,544	24,964
33,441	»	27,921	21,525	1,333	3,069	— 17,747	— 14,818	23,716
33,824	»	28,081	19,425	1,288	2,966	— 17,252	— 14,322	22,201
33,145	24,620	28,566	30,975	1,491	3,433	— 19,765	— 17,034	28,530
33,479	»	28,710	26,425	1,422	3,274	— 18,944	— 16,246	26,928
33,785	»	28,884	26,425	1,422	3,274	— 19,031	— 16,246	25,543
33,981	»	28,924	25,700	1,410	3,246	— 18,925	— 16,109	24,696
34,386	»	29,096	20,600	1,314	3,025	— 17,740	— 15,011	23,045
318,496	554,456	673,409	586,675	34,160	78,655	— 449,990	— 370,390	596,539

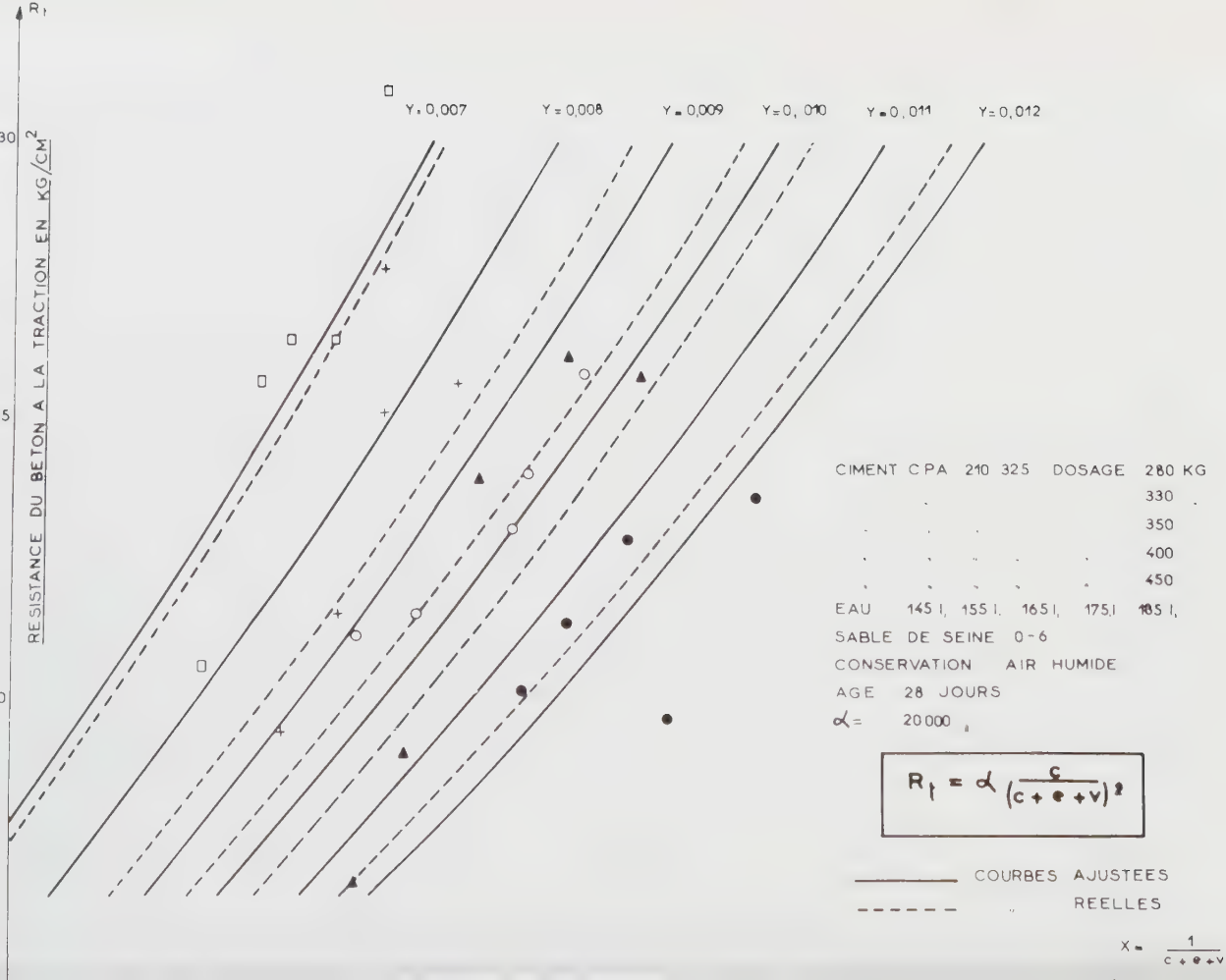


Fig. 10

Essai Brésilien.

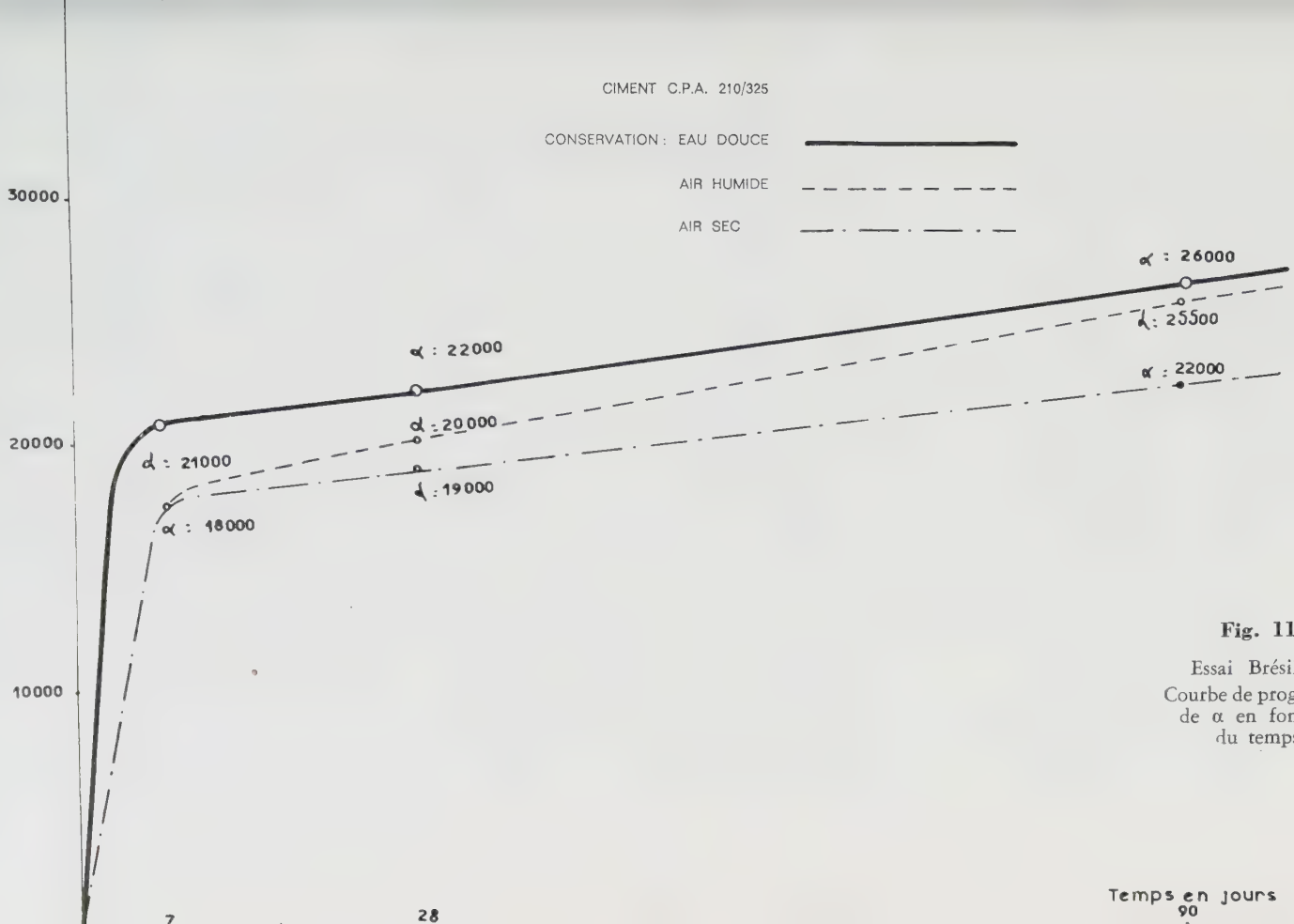


Fig. 11

Essai Brésilien.
Courbe de progression de α en fonction du temps.

α	Age (jours)	Conservation
18000	7	Air humide
20000	28	»
25500	90	»
21000	7	Eau douce
22000	28	»
26000	90	»
18000	7	Air sec
19000	28	»
22000	90	»

VIII. - Résumé et conclusion

On peut remarquer, dans la formule obtenue plus haut, que la résistance du béton à la traction est proportionnelle au volume du ciment et inversement proportionnelle au carré du volume intergranulaire. On remarque encore que cette formule ainsi établie est extrêmement simple et que les résultats obtenus sont très rapprochés de la réalité.

On peut donc calculer la résistance du béton à la traction en connaissant les volumes du ciment, de l'eau et des vides. Si le dosage en ciment c est souvent imposé, la quantité d'eau reste à déterminer. Elle peut l'être soit expérimentalement, soit approximativement au moyen des différentes formules empiriques connues.

On peut encore dire alors que la résistance du béton est une fonction croissante de $\frac{c}{(e+v)^2}$. On a donc le plus grand intérêt, pour accroître la qualité du béton, à augmenter au maximum son $\frac{c}{e+v}$, c'est-à-dire que, pour un dosage de ciment donné, il faut diminuer $e + v$, donc avoir un béton aussi compact que possible avec le minimum nécessaire d'eau de gâchage.

RÉSUMÉ

Le but de la présente étude est d'améliorer la résistance du béton à la traction, car jusqu'à ce jour, on a surtout considéré que le béton travaillait exclusivement à la compression, en négligeant ses possibilités de résistance à la traction.

Dans les calculs, la résistance du béton à la traction est toujours tenue pour nulle. Il en résulte un accroissement de prix de revient de l'ouvrage, car les sections obtenues se trouvent ainsi augmentées, surtout dans les ouvrages en béton armé et béton précontraint. D'autre part, les fissures provoquées par la faiblesse de la résistance du béton à la traction laissant l'eau pénétrer au sein du béton et attaquer l'acier dans les zones où se trouvent les armatures, la résistance générale de l'ouvrage s'en trouve amoindrie.

SUMMARY

The aim of the present study is to raise the tensile strength of concrete. For, so far attention has been mainly directed to compressive strength, and the potentialities of the tensile strength neglected.

Computations take the potential tensile strength as zero, thus leading to specifying a greater sectional area, particularly for RC and prestressed concrete, hence a higher cost. Moreover, the cracks in concrete, due to inadequate tensile strength, lower the overall strength of the work, for water gets in and attacks the rodding.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Recherches bibliographiques sur le compactage des sols.

Vu et approuvé :

Paris, le 11 mars 1962.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,
MARC ZAMANSKY.

Vu
et Permis d'imprimer :

LE RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,
JEAN ROCHE.

IMPRIMERIE CENTRALE
DE L'ARTOIS - ARRAS
2, rue Sainte - Marguerite